

Penerapan Metode Mikrotremor HVSRR untuk Penentuan Respons Dinamika Kegempaan di Kota Padang

Application of HVSRR Microtremor Method for Assessing Seismic Dynamic Response in Padang City

Pupung Susilanto¹, Drajat Ngadmanto¹, Daryono², Thomas Hardy¹, Suliyanti Pakpahan¹

¹)Puslitbang BMKG, Jl. Angkasa 1 No. 2 Kemayoran, Jakarta Pusat - Indonesia

²)Deputi Bidang Geofisika BMKG, Jl. Angkasa 1 No. 2 Kemayoran, Jakarta Pusat - Indonesia

Naskah diterima 20 November 2015, selesai direvisi 15 Juni 2016, dan disetujui 28 Juli 2016

e-mail: pupungsusilanto@gmail.com

ABSTRAK

Peristiwa gempabumi 30 September 2009, memperlihatkan bahwa Kota Padang merupakan daerah rawan gempabumi. Sebagai ibu kota provinsi, Kota Padang berperan sebagai pusat pemerintahan dan perekonomian, sehingga harus dilindungi dari bahaya gempabumi. Penelitian mikrozonasi dengan metode pengukuran mikrotremor ini bertujuan untuk mengetahui respons dinamika kegempaan setempat di Kota Padang. Data mikrotremornya terdiri atas 180 titik hasil pengukuran yang tersebar di Kota Padang dengan grid 500 m x 500 m. Pengukuran dilakukan dengan menggunakan *digital portable seismograph* tiga komponen dengan durasi pengukuran selama 30 menit dan frekuensi *sampling* 100 Hz. Data diolah dengan menggunakan metode *HVSRR (Horizontal to Vertical Spectrum Ratio)*. Indeks kerentanan seismik (K_g) diperoleh dengan mengkuadratkan nilai puncak spektrum mikrotremor dibagi dengan frekuensi dominannya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai frekuensi dominan (f_0) di daerah penelitian berkisar antara 0,5 – 1,9 Hz, H/V amplifikasi (A) antara 0,6 – 9,7, dan nilai indeks kerentanan seismik (K_g) berkisar antara 0,3-162,0. Persebaran secara spasial indeks kerentanan seismik menunjukkan bahwa hampir seluruh daerah penelitian merupakan daerah yang mempunyai kerentanan yang cukup tinggi terhadap bahaya gempabumi. Kerentanan yang tertinggi tersebar di bagian barat dan utara daerah penelitian, sedangkan kerentanan yang lebih rendah tersebar di bagian timur dan selatan daerah penelitian.

Kata kunci: *HVSRR*, indeks kerentanan seismik, mikrotremor

ABSTRACT

The earthquake on September 30, 2009, shows that Padang City is an earthquake vulnerable area. As the capital of a province, it plays the role as the centre of governance and economy. Thus, Padang City should be protected from earthquake hazards. Microzonation research with microtremor measurement method aims to determine the dynamic response of the local seismicity in the city. Microtremor data consist of 180 measurement points that are scattered in Padang with a grid of 500 mx 500 m. The measurements used a digital portable seismograph three components with time duration 30 minutes and 100 Hz of sampling frequency. The data are processed using *HVSRR (Horizontal to Vertical Spectrum Ratio)* method. The seismic vulnerability index (K_g) obtained by squaring the peak value of microtremor spectrum divided by its dominant frequency. The results show that the dominant frequency (f_0) in the studied area ranges between 0.5 to 1.9 Hz, H/V amplification (A) between 0.6 to 9.7, and the value of the seismic vulnerability index (K_g) ranges between 0.3 to 162.0. Spatial distribution of the seismic vulnerability index shows that almost of the entire researched area has a fairly high susceptibility to earthquake hazards. The highest vulnerability spreads across the western and northern parts of the studied area, while a lower susceptibility scatters in the east and south of the studied area.

Keywords: *HVSRR*, seismic vulnerability index, microtremor

PENDAHULUAN

Kota Padang dan sekitarnya, secara tektonis merupakan salah satu kawasan yang memiliki tingkat aktivitas kegempaan yang sangat tinggi di Indonesia. Kegempaan yang aktif ini disebabkan oleh adanya zona subduksi di bagian barat Sumatra sebagai wilayah tumbukan lempeng Indo-Australia dengan lempeng Eurasia. Selain itu, Kota Padang menjadi kawasan yang sangat rawan gempabumi akibat aktivitas Sesar Sumatra, yang membentang di sepanjang Pegunungan Bukit Barisan dari Teluk Semangko sampai ke Aceh.

Berdasarkan katalog gempabumi merusak di Indonesia (Supartoyo dr., 2006), Kota Padang dan sekitarnya sudah beberapa kali mengalami gempabumi merusak. Sejarah gempabumi merusak di daerah ini adalah Gempabumi Padang (1822, 1835, 1981, 1991, 2005), Gempabumi Singkarak (1943), Gempabumi Pasaman (1977), dan Gempabumi Agam (2003). Gempabumi yang diikuti gelombang tsunami terjadi di Mentawai (1861, 2010) dan Sori-Sori (1904).

Pada 30 September 2009, Kota Padang diguncang gempabumi tektonik berkekuatan $M=7,6$ SR yang terletak pada koordinat $99,65^{\circ}$ BT dan $0,84^{\circ}$ LS pada kedalaman 71 km (http://www.bmkg.go.id/BMKG_Pusat/Publikasi/). Gempabumi ini memberi guncangan kuat dengan PGA mencapai 300 gal di daerah Padang dan sekitarnya. Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) menyatakan Kota Padang terdapat korban jiwa sebanyak 383 orang dan ribuan rumah rusak (<http://geospasial.bnpb.go.id>).

Kota Padang sebagai ibu kota provinsi yang menjadi pusat pemerintahan dan perekonomian di Sumatra Barat, harus dilindungi dari bahaya gempabumi.

Beberapa penelitian telah menemukan bahwa tingkat kerusakan akibat gempabumi sangat dipengaruhi oleh kondisi tanah setempat. Sebagai contoh kasus fenomena efek tapak lokal adalah gempabumi Bantul 27 Mei 2006 dan gempabumi Michoacan, Mexico 19 September 1985. Kedua gempabumi ini menjadi sangat merusak karena tingginya respons tanah setempat saat terjadi gempabumi. Terkait peristiwa gempabumi tersebut, secara geologis zona Graben Bantul merupakan cekungan yang berisi material lepas produk erupsi Gunungapi Merapi (Daryono, 2011), sementara Mexico City dibangun di atas bekas rawa (Gurler

dr., 2000). Ketebalan lapisan sedimen, jenis material batuan, dan geometri cekungan telah memicu terjadinya resonansi gelombang seismik, sehingga menimbulkan amplifikasi getaran gempabumi.

Salah satu metode yang dapat dilakukan untuk menggambarkan kondisi bawah permukaan adalah dengan melalui pengukuran mikrotremor. Pengukuran mikrotremor menghasilkan parameter frekuensi dominan (f_0) dan faktor amplifikasi (A), serta turunan kedua parameter tersebut, yaitu indeks kerentanan seismik (K_g).

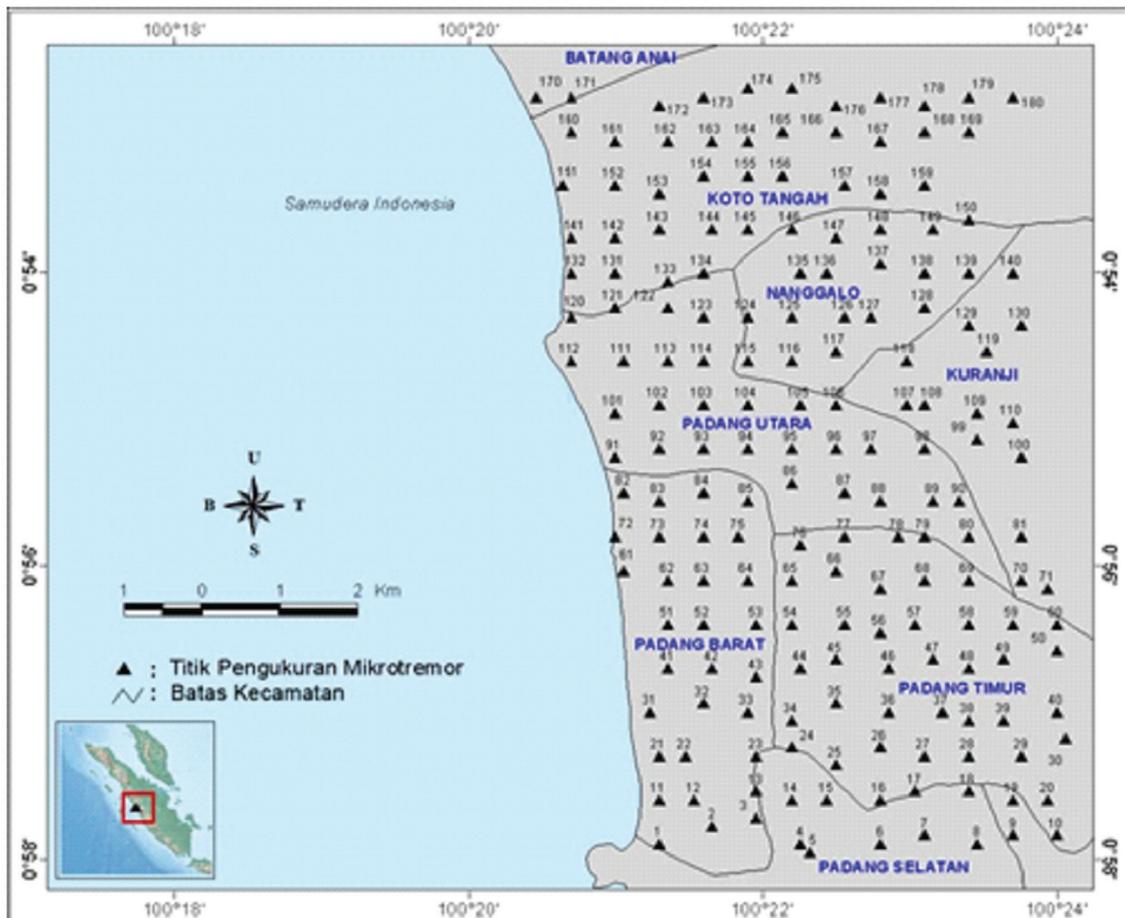
Indeks kerentanan seismik (K_g) adalah indeks yang menggambarkan tingkat kerentanan lapisan tanah permukaan terhadap deformasi saat terjadi gempabumi. Nilai K_g ini dapat digunakan untuk memprediksi daerah-daerah yang mengalami kerusakan bila terjadi gempabumi. Hubungan antara indeks kerentanan seismik dengan rasio kerusakan pernah dikaji di Kobe, Jepang (Nakamura dr., 2000), di Mexico City, Mexico (Gurler dr., 2000), di Manila, Filipina (Saita dr., 2004), dan di California, Amerika Serikat (Nakamura, 2008).

Nakamura dr. (2000) mengkaji hubungan antara indeks kerentanan seismik dengan rasio kerusakan menggunakan data gempabumi Kobe 1995. Hasil kajiannya menunjukkan bahwa distribusi indeks kerentanan seismik tinggi terletak pada zona kerusakan parah yang tersebar dengan membentuk jalur kerusakan.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui efek setempat kejadian gempabumi di wilayah Kota Padang dan sekitarnya. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk mengetahui sebaran nilai frekuensi dominan, faktor amplifikasi, dan indeks kerentanan seismik (K_g) berdasarkan pengukuran mikrotremor.

Lokasi dan Kondisi Geologi

Daerah penelitian meliputi Kota Padang, Sumatra Barat, dengan batas koordinat $0^{\circ}52'44,40''$ - $0^{\circ}57'57,60''$ LS dan $100^{\circ}20'27,60''$ - $100^{\circ}24'03,60''$ BT (Gambar 1). Daerah Padang dan sekitarnya ini merupakan suatu paparan endapan fluviatil, swamp, dan aluvium yang terletak pada "Padang Graben", bagian timur laut yang dibatasi oleh patahan aktif segmen Sianok dan Sumani yang berarah hampir barat laut – tenggara. Geologi daerah ini disusun



Gambar 1. Wilayah penelitian dan lokasi pengukuran mikrotremor.

oleh endapan Kuartar yang terdiri atas perulangan satuan pasir bersifat dominan berbutir halus hingga kasar dengan sisipan lanau dan lempung. Diatasnya dijumpai endapan Holosen berupa pasir pantai yang berhadapan dengan endapan laut terbuka yang dibatasi oleh graben berupa patahan-patahan yang berarah hampir barat laut – tenggara. Tebal endapan Kuartar di daerah ini mencapai kurang lebih 150 – 200 m (Soebowo, 2010).

METODE PENELITIAN

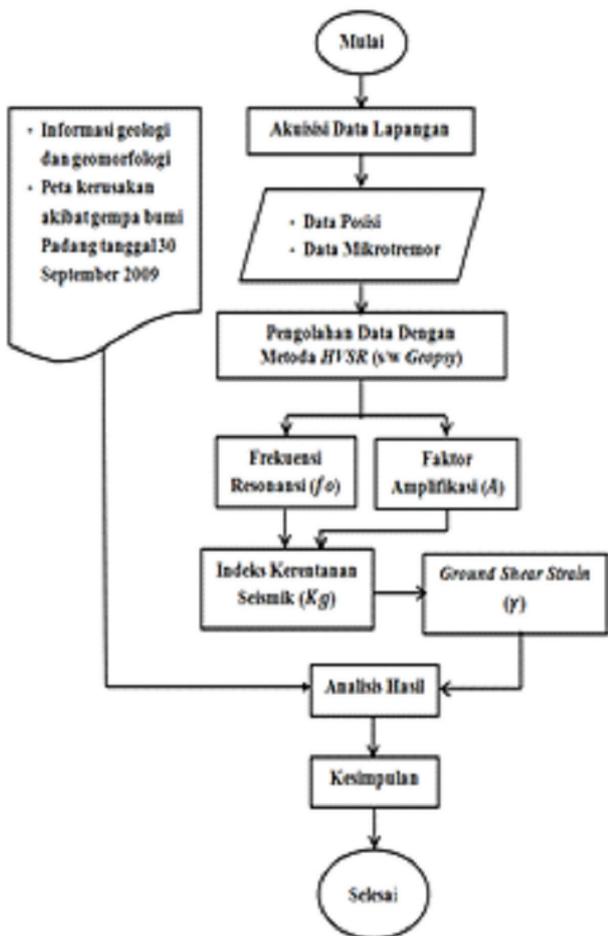
Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data primer hasil pengukuran mikrotremor di Kota Padang dan sekitarnya. Pengukuran mikrotremor dilakukan pada bulan Juli - Agustus 2011 sebanyak 180 titik dengan grid 500 m x 500 m (Gambar 1). Pengukuran dilakukan dengan menggunakan digital portable seismograph periode pendek tipe TDL-303 tiga komponen dengan frekuensi

sampling 100 Hz selama 30 menit. Secara umum, diagram alur langkah penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 2.

Pengolahan data mikrotremor dengan metode HVSR (Gambar 3) dilakukan dengan menggunakan software Geopsy. Metode HVSR didasarkan pada perbandingan antara amplitudo spektral komponen horizontal terhadap komponen vertikal (Nakamura, 1989). Perbandingan spektral antara komponen horizontal dan komponen vertikal dihitung dengan rumus:

$$(1) \quad f) = \frac{\sqrt{A_{east}(f)^2 + A_{north}(f)^2}}{A_{vertical}(f)}$$

dengan A_{east} , A_{north} , dan $A_{vertical}$ berturut-turut adalah amplitudo spektral komponen EW, NS, dan komponen V.

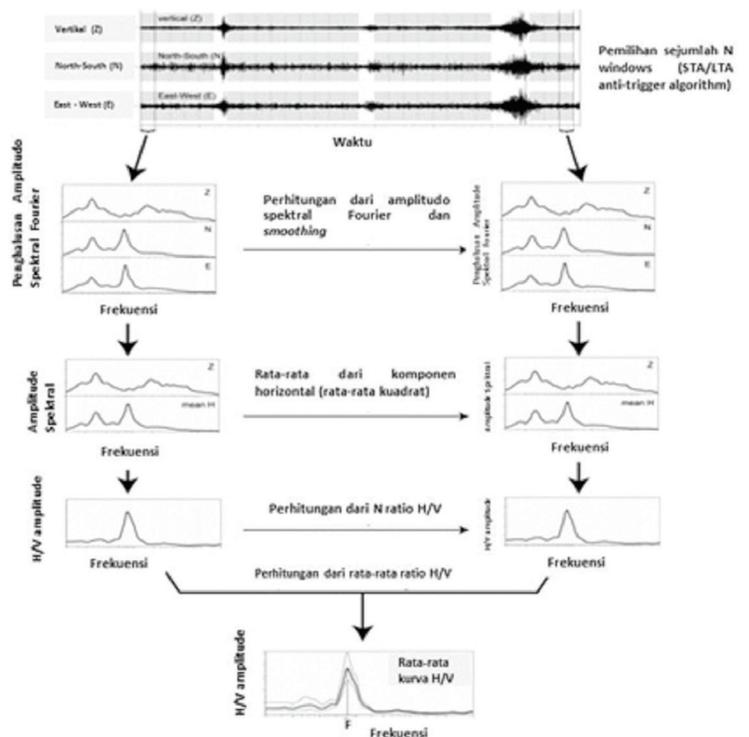


Gambar 2. Alur penelitian.

Pengolahan data mikrotremor dimulai dengan melakukan *windowing* dengan panjang *window* 30 detik. Selanjutnya adalah perhitungan spektrum *Fourier* dengan *FFT* (*Fast Fourier Transform*) untuk masing-masing *window*. Perhitungan ini dilakukan pada setiap komponen *U-D*, *N-S*, dan *E-W*. Kemudian dilakukan penghalusan atau *smoothing spektrum fourier* dengan metode *Konno-Ohmachi* (*Sesame European Research Project*, 2004).

Selanjutnya, komponen horizontalnya (*N-S* dan *E-W*) disatukan dengan rata-rata kuadrat. Setelah itu dilakukan perhitungan *H/V* untuk masing-masing *window*. Langkah terakhir adalah menghitung rata-rata *H/V* semua *window* untuk mendapatkan nilai *H/V* di setiap titik pengukuran.

Kurva *H/V* yang diperoleh adalah kurva *H/V* sebagai fungsi frekuensi. Biasanya kurva ini menampilkan suatu puncak yang menunjukkan frekuensi dominan beserta nilai puncak *H/V* atau faktor amplifikasinya. Langkah selanjutnya adalah menghitung nilai indeks kerentanan seismik (*Kg*). Indeks kerentanan seismik yang diperoleh dengan mengkuadratkan nilai puncak spektrum mikrotremor (*A*) dibagi frekuensi predomian (f_0),



Gambar 3. Ilustrasi pengolahan data mikrotremor menggunakan metode *Horizontal to Vertical Spectrum Ratio* [11].

yang dirumuskan oleh Nakamura (2000) sebagai berikut:

$$(2) \quad Kg = \frac{A^2}{f_0}$$

Hubungan antara nilai frekuensi dominan dengan ketebalan sedimen dinyatakan oleh Bard (2000) dalam persamaan:

$$(3) \quad f_0 = V_{rata-rata}/4H$$

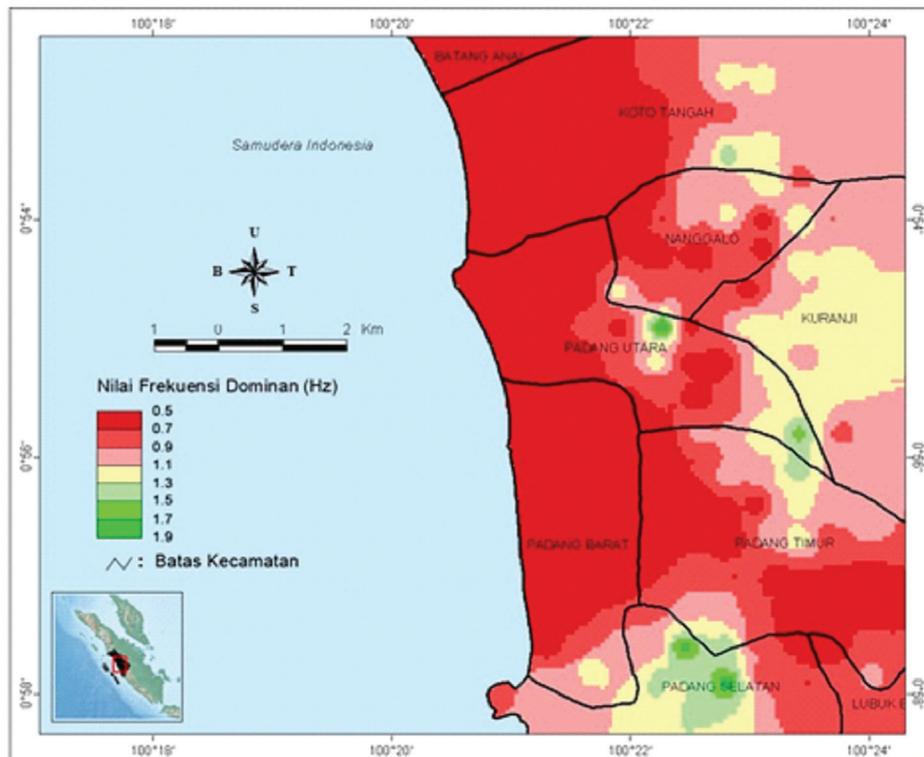
HASIL DAN PEMBAHASAN

Distribusi Frekuensi Dominan (f_0) dan Faktor Amplifikasi (A) terlihat pada Gambar 4 yang menunjukkan sebaran spasial nilai f_0 . Distribusi frekuensi dominan relatif membesar ke arah timur dengan range frekuensi berkisar antara 0,5 - 1,9 Hz. Sebaran nilai frekuensi dominan ini memiliki kesesuaian dengan kondisi fisiografi dan morfologi daerah penelitian yang ke arah timur secara morfologis menunjukkan daerah perbukitan.

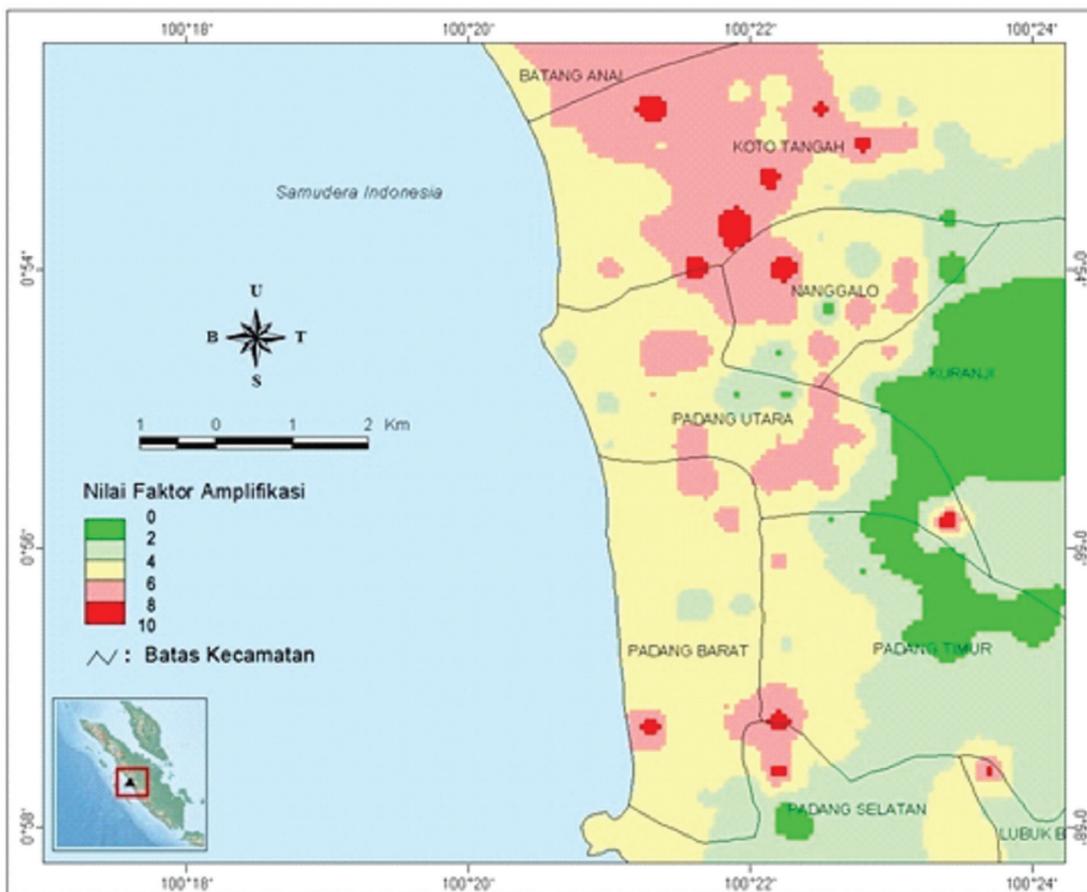
Frekuensi dominan memiliki hubungan yang erat dengan ketebalan sedimen (Petermansdr., 2006). Seperti halnya yang dikemukakan juga oleh Parolai dr.(2001) dan Isicico (2004) bahwa semakin dalam batuan dasar maka frekuensi dominannya semakin rendah. Sebaliknya semakin dangkal batuan dasar, maka frekuensi dominannya semakin tinggi.

Dalam hal ini f_0 adalah frekuensi dominan, V rata-rata adalah rata-rata kecepatan gelombang S pada lapisan sedimen, H adalah ketebalan sedimen.

Sebaran nilai frekuensi dominan ini menunjukkan bahwa nilai-nilai f_0 yang kecil tersebar di bagian barat daerah penelitian, sementara nilai-nilai f_0 tinggi terdapat di bagian timur dan selatan daerah penelitian. Sebagian besar wilayah Kota Padang bagian barat memiliki nilai frekuensi resonansi rendah. Rendahnya nilai f_0 di sebagian besar Kota Padang sangat berkaitan dengan morfologi daerahnya yang berupa dataran yang disusun oleh batuan lunak. Nilai f_0 rendah ini sangat terkait dengan tebalnya material aluvium yang membentuk dataran Kota Padang yang menurut



Gambar 4. Peta persebaran frekuensi dominan Kota Padang.



Gambar 5. Peta nilai H/V amplifikasi Kota Padang.

Soebowo drr.(2010) merupakan sebuah *graben*. Nilai f_0 berangsur-angsur berubah menjadi semakin besar ke arah Kota Padang bagian timur dan selatan yang berdekatan dengan kawasan perbukitan yang disusun oleh batuan keras.

Meskipun daerah penelitian tidak mencapai kawasan perbukitan di sebelah timur Kota Padang, tetapi data frekuensi menunjukkan bahwa bagian timur Kota Padang memiliki ketebalan lapisan sedimen yang relative tipis. Kondisi ini tercermin pada persebaran nilai f_0 yang semakin besar. Nilai frekuensi dominan yang semakin besar menggambarkan kondisi ketebalan lapisan sedimen yang makin tipis.

Sebaran nilai puncak rasio H/V amplifikasi (A) bervariasi dalam kisaran antara 0,6 dan 9,7. Persebaran nilai amplifikasi di bagian barat daerah penelitian cenderung memiliki nilai amplifikasi yang relatif lebih besar dibandingkan dengan bagian timur dan selatan (Gambar 5).

Terdapat korelasi yang signifikan antara frekuensi dominan dan nilai amplifikasi yang terukur. Oleh karenanya, dapat dikatakan bahwa variasi nilai A tidak dipengaruhi oleh ketebalan sedimen. Wang dan Hao (2002) menjelaskan bahwa variasi parameter sedimen (modulus geser, *damping* rasio, dan densitas), dan saturasi lapisan sedimen memengaruhi faktor amplifikasi (Warnana drr., 2011), sehingga faktor geologi sangat dominan terhadap variasi nilai amplifikasi (Gambar 4 dan 5).

Penggunaan nilai puncak spektrum H/V sebagai nilai amplifikasi di suatu tempat masih menjadi perdebatan para ahli (Nguyen drr., 2003). Namun, beberapa peneliti telah menemukan adanya korelasi antara puncak spektrum H/V dengan distribusi kerusakan gempa bumi (Daryono drr., 2009; Panou drr., 2004; Cara drr., 2006; dan Jafari drr., 2005). Dalam penelitiannya di Bantul, Yogyakarta, Daryono drr. (2009) menemukan bahwa nilai A ternyata memiliki korelasi dengan nilai rasio

kerusakan, daerah yang mengalami kerusakan maksimum memiliki nilai A yang lebih besar dan sebaliknya.

Distribusi Indeks Kerentanan Seismik (Kg)

Untuk menjelaskan indeks kerentanan seismik ini dapat diterangkan dengan perhitungan nilai *ground shear strain*. Nilai *ground shear-strain* (γ) pada lapisan tanah permukaan menggambarkan kemampuan material lapisan tanah untuk saling meregang atau bergeser saat terjadi gempa bumi. Menurut Ishihara (1982) nilai 1.000×10^{-6} tanah menunjukkan karakter nonlinear, dan pada nilai $\gamma = 10.000 \times 10^{-6}$ tanah dapat terjadi deformasi dan likuifaksi (Tabel 1). Untuk menghitung *ground shear-strain* lapisan tanah permukaan di suatu tempat saat terjadi gempa bumi, Nakamura (1997),

merumuskan:

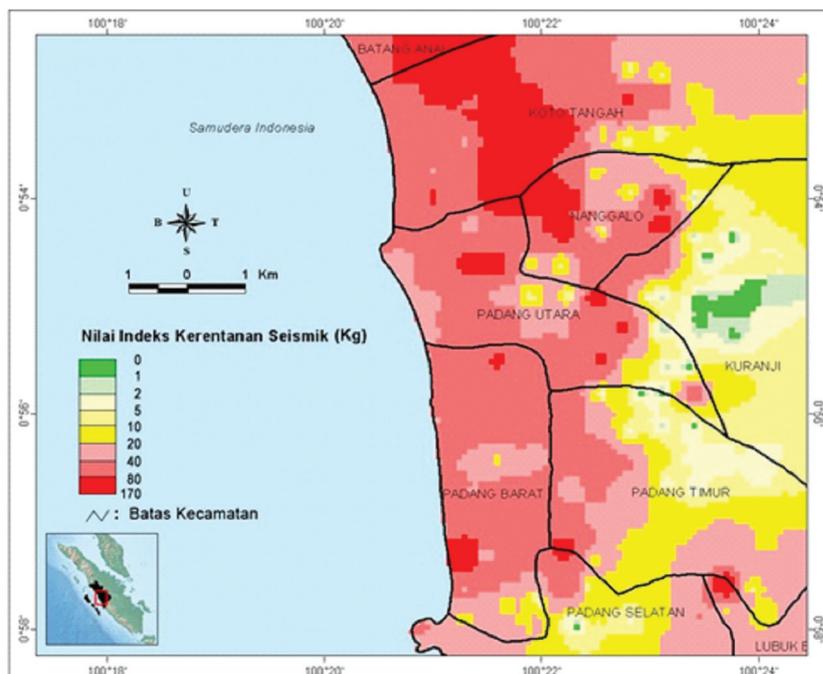
$$(4) \quad \gamma = \frac{A^2}{f_0} \frac{a}{\pi^2 v_b}$$

Dengan A^2/f_0 adalah indeks kerentanan seismik (Kg), a adalah percepatan maksimum (*peak ground acceleration/PGA*), dan v_b adalah kecepatan gelombang *shear* pada *bedrock*.

Pada gempa bumi Padang 30 September 2009 terukur nilai *PGA* di daerah penelitian sekitar 300gal (Sukanta dr., 2010). Dengan asumsi $v_b = 600$ m/det., didapatkan nilai $\gamma \geq 10^{-3}$ untuk $Kg \geq 2$ dan $\gamma \geq 10^{-2}$ untuk $Kg \geq 20$. Dari data Kg didapatkan nilai pada saat terjadi gempa bumi Padang M7,6 adalah sebesar $1,5 \times 10^{-4} - 8,2 \times 10^{-2}$. Hal ini menunjukkan bahwa gempa bumi Padang 30 September 2009 telah menimbulkan guncangan

Tabel 1. Nilai *Strain* dan Dinamika Tanah (Ishihara,1982)

Size of Strain	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}
Phenomena	Wave, Vibration		Crack, Settlement		Landslide, Soil Compaction, Liquefaction	
Dynamic Properties	Elasticity		Elasto-Plasticity		Collapse	
					Repeat-Effect, Speed-Effect of Loading	



Gambar 6. Peta indeks kerentanan seismik Kota Padang.

yang sangat kuat, hingga menimbulkan kerusakan bangunan rumah yang cukup banyak dan terjadinya likuefaksi.

Distribusi nilai indeks kerentanan seismik (K_g) di Kota Padang berkisar antara 0,3 dan 162,0. Secara umum, distribusi nilai-nilai yang relatif tinggi banyak dijumpai di bagian barat daerah penelitian yang merupakan daerah pesisir pantai. Daerah-daerah tersebut meliputi bagian barat Kecamatan Koto Tengah, Nanggalo, Padang Utara, Padang Timur, dan bagian barat Kecamatan Padang Timur (Gambar 6).

Nilai-nilai K_g yang relatif rendah terkonsentrasi di bagian timur dan selatan daerah penelitian. Kota Padang bagian timur yang lokasinya berdekatan dengan kawasan perbukitan sebagian besar wilayahnya merupakan daerah dengan indeks kerentanan seismik yang relatif rendah, dengan nilai indeks kerentanan seismik kurang dari 2. Daerah ini mencakup wilayah Kecamatan Padang Timur bagian timur, Kecamatan Kuranji bagian timur, dan Kecamatan Koto Tengah bagian timur. Persebaran nilai indeks kerentanan seismik rendah juga terdapat di bagian selatan daerah penelitian, yang mencakup wilayah Kecamatan Padang Selatan bagian utara. Lajur ini secara geomorfologis merupakan kawasan perbukitan yang tersusun oleh batuan keras seperti terlihat pada beberapa singkapan permukaan.

Penelitian ini mendukung pendapat sebelumnya yang menyatakan bahwa indeks kerentanan seismik tinggi berhubungan dengan fasies endapan fluvial, sedangkan indeks kerentanan seismik rendah berhubungan dengan batuan dasar yang keras (Daryono, 2011). Pendapat semacam ini juga pernah dikemukakan oleh Nakamura dr. (2000) dalam penelitiannya di Distrik Marina, San Francisco. Distrik Marina merupakan kawasan yang mengalami kerusakan parah saat terjadi gempa bumi Loma Prieta 1989. Daerah pantai yang merupakan endapan aluvium yang memiliki indeks kerentanan seismik tinggi, ternyata mengalami kerusakan parah saat terjadi gempa bumi. Nilai indeks kerentanan seismik berubah mengecil setelah memasuki daerah perbukitan berbatuan lebih keras yang tidak mengalami kerusakan saat gempa bumi. Penelitian Nakamura dr. (2000) dan Nakamura (2008) menunjukkan bahwa indeks kerentanan seismik tinggi terdapat di daerah pesisir yang tersusun oleh material aluvium. Indeks kerentanan selanjutnya mengecil begitu memasuki

kawasan perbukitan berbatuan lebih keras. Hal serupa juga dinyatakan Gurler dr. (2000) bahwa indeks kerentanan tinggi terdapat dekat jalur aliran sungai, kawasan reklamasi, dan bekas rawa. Indeks kerentanan seismik menurun setelah memasuki perbukitan berbatuan lebih keras.

Penelitian ini juga menunjukkan bahwa Kota Padang merupakan daerah yang sangat berbahaya apabila mengalami gempa bumi, terutama bila PGA mencapai 300 gal atau di atasnya. PGA ini dapat menyebabkan guncangan besar di hampir seluruh wilayah Kota Padang dan berpotensi menyebabkan deformasi dan likuefaksi, terutama di wilayah bagian barat ketika nilai K_g lebih dari 20. Mitigasi yang dapat dilakukan adalah dengan membangun bangunan yang memenuhi syarat sebagai bangunan tahan gempa. Sementara itu, baik masyarakat maupun pemerintah daerah harus menyadari sepenuhnya bahwa Kota Padang merupakan daerah yang rawan apabila mengalami gempa bumi, sehingga harus selalu waspada dan siap siaga.

KESIMPULAN

Nilai frekuensi dominan (f_0) yang terukur di lokasi penelitian berkisar antara 0,5 – 1,9 Hz, nilai faktor amplifikasi (A) berkisar antara 0,6 sampai 9,7, dan indeks kerentanan seismik (K_g) di daerah penelitian berkisar antara 0,3-162,0. Dengan melihat penyebaran spasial nilai-nilai f_0 , A , dan K_g tersebut disimpulkan bahwa wilayah Kota Padang bagian barat memiliki kerentanan seismik yang tinggi jika dibandingkan dengan wilayah Kota Padang bagian timur dan selatan. Wilayah-wilayah bagian barat tersebut sangat berbahaya apabila mengalami gempa bumi dengan PGA mencapai 300 gal atau di atasnya, sehingga diharapkan bangunan di wilayah ini memenuhi syarat sebagai bangunan tahan gempa untuk meminimalkan kerusakan dan kerugian.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih kami ucapkan kepada semua pihak yang telah membantu dan memperlancar kegiatan penelitian ini, terutama teman-teman yang terlibat dalam pengumpulan data di lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

Bard, P.Y., 2000. Lecture Notes On Seismology,

- Seismic Hazard Assessment and Risk Mitigation, *International Training Course*, Postdam, h.160.
- Cara F., Cultrera, G., Azzara, M., Rubeis, V.D.,Giudio, G.D., Giammarinaro, M.S., Tosi, P.,Vallone, P. dan Rovelli,A., 2006. Microtremor Measurement in the City of Palermo, Italy. Institutodi Geofisica Volcanologia, Via di Vigna Murata, Italy.
- Daryono, 2011.Indeks kerentanan seismik berdasarkan mikrotremor pada setiap satuan bentuk lahan di zona Graben Bantul Daerah Istimewa Yogyakarta. Disertasi, Fakultas Geografi: Universitas Gadjah Mada.
- Daryono, Sutikno,Sartohadi, J., Dulbahri, Brotopuspito, K.S.,2009. Efek Tapak Lokal di Graben Bantul Berdasarkan Pengukuran Mikrotremor,*International Conference Earth Science and Technology*, Yogyakarta, 6-7 Agustus 2009.
- Gurler, E.D., Nakamura,Y.,Saita, J.,Sato,T., 2000. Local site effect of Mexico City Based on Microtremor Measurement.*6thInternational Conference on Seismic Zonation*, Palm Spring Riviera Resort, California, USA, pp.65.
- Ishihara, K., 1982.*Introduction to Dynamic Soil Mechanism*. Japan.
- Isicico, E., 2004.*Individual training course*. Report.Institute of Geophysics and Geology Moldavian Academy of Sciences.
- Jafari, M.K., Ghayamghamian, M.R., Davoodi, M., Kamalian, M.,dan Sohrabi-Bidar, A.,2005. Site Effect of The 2003 Bam, Iran, Earthquake. *Journal Earthquake Spectra*, Vol. 21.
- Nakamura, Y.,1989. A Method for Dynamic Characteristic Estimation of Subsurface Using Microtremor on the Ground Surface.Q.R. of R.T.I. 30-1, h.25-33.
- Nakamura, Y., 1997.Seismic Vulnerability Indices For Ground and Structures Using Microtremor, *World Congress on Railway Research in Florence*, Italy.
- Nakamura, Y., Sato, T., dan Nishinaga, M., 2000.Local Site Effect of Kobe Based on Microtremor Measurement, *Proceeding of the Sixth International Conference on Seismic Zonation EERI*, Palm Springs California.
- Nakamura, Y., 2000. Clear Identification of Fundamental Idea of Nakamura's Technique and Its Application. *World Conference of Earthquake Engineering*.
- Nakamura, Y.,2008.On The H/V Spectrum.*The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China.
- Nguyen, F., Van Rompaey, G., Teerlynck, H., Van Camp, M., Jougmans, D. dan Camelbeeck, T.,2003.Use of Microtremor for Assessing Site Effect in Northern Belgium-Interpretation of The Observed Intensity During The Mag. 5.0 June 11 1938 Earthquake,*Journal of Seismology*, Vol. 1-3.
- Panou, A.A., Theodulidis, N., Hatzidimitriou, P.M., Papazachos, C.B.,dan Stylianidis, K., 2004. Ambient Noise Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio for Assessing Site Effect in Urban Environments: The Case of Thessaloniki City
- Parolai, S., Bormann, P., Milkereit, C., 2001. Assessment of the Natural Frequency of the Sedimentary Cover in the Cologne Area (Germany) Using Noise Measurement. *Journal of Earthquake Engineering*, 5, 541-564.
- Petermans, T., Delveeschouwer, X, Pouriel F, Rosset P., 2006.Mapping the Local Seismic Hazard in the Urban Area of Brussels, Belgium.*Proceedings of the 10th IAEG congress*, Nottingham.

- Saita, J., Bautista, M.L.P., dan Nakamura, Y., 2004. On Relationship Between The Estimated Strong Motion Characteristic of Surface Layer and The Earthquake Damage: Case Study at Intramuros, Metro Manila. *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 905, Vancouver, B.C., Canada.
- Sesame European Research Project, 2004. *Guidelines For The Implementation of The H/V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibrations*, European Commission-Research General Directorate.
- Soebowo, E., Anwar, H.Z., Tohari, A., Wibowo, S., Sarah, D., dan Subardja, A., 2010. Kajian Kerentanan Likuifaksi dan Keteknikaan Bawah Permukaan pada Zona Bahaya Gempabumi di Daerah Pesisir Padang, Sumatra Barat. Laporan Akhir Program Insentif Peneliti dan Perekayasa LIPI Tahun 2010.
- Sukanta, I.N., Pudja, I.P., Pakpahan, S., Badriyah, I.U., Muchlis, Mudhalifana, W.S., dan Tresnawati, R., 2010. Accelerograph BMKG dalam Penentuan Peta Intensitas Gempa Kuat. Laporan Akhir Program Insentif Peneliti dan Perekayasa, Jakarta, Puslitbang BMKG.
- Supartoyo, Eka T.P., dan Surono. 2006. *Katalog Gempabumi Merusak di Indonesia Tahun 1629-2006*, Edisi Ketiga.
- Wang, Sheng dan Hao, Hong, 2002. Effects of Random variations of Soil Properties on Site Amplification of seismic Ground Motion, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol 22, issue 7, September 2002, h. 551-564.
- Warnana, D.D., Soemitro, R.A.A., dan Utama, W., 2011. *Application of Microtremor HVSR Method for Assessing Site Effect in Residual Soil Slope*, *International Journal of Basic and Applied Sciences IJBAS-IJENS*, Vol: 11 No: 04.
- <http://geospasial.bnpb.go.id/2009/10/28/peta-jumlah-kerusakan-rumah-akibat-gempa-di-provinsi-sumbar-update-28-oktober-2009-pukul-08-00>, diakses pada tanggal 16 Oktober 2011
- http://www.bmkg.go.id/BMKG_Pusat/Publikasi/Artikel/Artikel_Detail.bmkg?id=75hj1843810bmo715815